环境友好型直流电缆料聚丙烯绝缘的电树枝研究进展

朱乐为　杜伯学

（天津大学电气自动化与信息工程学院　天津　300072）



朱乐为　女　1990年生，博士研究生，主要从事电缆绝缘材料老化评估与改性方面的研究工作。



杜伯学　男　1961年生，博士，教授，博士生导师，主要从事聚合物绝缘材料的可靠性和安全性理论与试验、高温超导电介质、纳米复合绝缘材料、电气绝缘在线监测、高电压新技术等方面的研究工作。

摘要：聚丙烯因具有优异的电气和耐热性能，符合环保可回收电缆绝缘材料的发展需求，从而引起广泛关注。高压直流电缆在运行过程中，除了承受直流额定电压外，还要承受脉冲电压，导致线路电压急剧变化，加剧电场畸变。电缆温度变化影响绝缘材料电导率及空间电荷积聚，使绝缘材料内部电场畸变，导致电树枝的引发和生长。本文对比了相同条件下聚丙烯与交联聚乙烯电树枝生长特性，分析了直流脉冲复合场、温度等因素对聚丙烯电树枝生长特性的影响规律，探讨了不同方法抑制电树枝的机理。

关键词：高压直流电缆　聚丙烯　电树枝　直流脉冲复合场　温度

中图分类号：TM85

Research Status on Electrical Tree of Polymer Insulation Materials in HVDC Cables

Zhu Lewei　Du Boxue

（School of Electrical and Infermation Engineering

Tianjin University　Tianjin　300072　China）

Abstract: As the environmentally friendly and recyclable cable insulation materials, polypropylene (PP) has attracted wide attention due to its excellent electrical and heat resistance properties. Besides the DC voltage, the operating impulse overvoltage often occurs in HVDC cable. At the same time, the change of cable temperature affects the electrical conductivity and space charge accumulation of insulating materials, which leads to the distortion of electric field in insulating materials, leading to the initiation of electrical trees. In this paper, the growth characteristics of polypropylene and crosslinked polyethylene were compared under the same conditions. The effects of DC-pulse combined electric field and temperature on the growth characteristics of polypropylene were analyzed, and the mechanism of different methods to restrain the electrical tree was discussed.

Keywords: HVDC cable, polypropylene, electrical tree, DC-pulse combined voltages, temperature

收稿日期：2018-08-02

国家自然科学基金（51537008）项目和国家重点基础研究发展计划（973计划）（2014CB239501）。

1 引言

电树枝现象是绝缘材料中由于杂质、气泡等缺陷造成局部电场集中导致局部击穿，进而形成的微米级放电破坏通道，因其形状与树枝相似，被称为电树枝[1]。电树枝一旦产生，就会以极快的速度发展，一旦电树枝生长至穿过绝缘层，就会发生电气故障，从而影响电缆的运行安全[2]。1972 年，日本学者在电气绝缘与电介质现象会议上的报道，明确确定了电树枝老化现象是固体电介质绝缘累积破坏的结果，国内外学者围绕这一问题开展了广泛研究[3]。但早期，大部分研究是针对交流电压下的电树枝展开。学者们普遍认为，注入或产生的载流子对聚合物链的直接撞击破坏，以及注入和产生的载流子复合产生的能量是导致聚合物电树枝引发的重要原因[4-6]。而在直流电压下，由于极性的单一和波形的长期稳定，注入和产生的载流子不易获得足够能量去撞击分子链，很难产生足够的能引发电树枝的能量。然而，高压直流电缆在运行过程中，除了承受直流额定电压外，还要承受脉冲电压。这些脉冲电压可能是由架空线路引入的雷电脉冲电压，或者是线路故障及十二脉动引起的操作脉冲电压[7-9]。当这些脉冲与高压直流电缆中的直流电压相复合时，将产生一个复杂的直流脉冲复合场，导致线路电压急剧变化，加剧电场畸变[10-12]。高压直流电缆在运行过程中，由于电压等级高，通过电缆的电流大，持续通过大电流的线芯会产生较多热量，从而导致电缆长期在较高的温度条件下运行[13]。直流电场下电缆绝缘中的电场强度取决于绝缘电阻率，电阻率受温度影响较大，因此电场强度受温度影响。同时，温度的变化还会影响电缆绝缘中电荷的注入和迁移率。随着温度的升高，电荷注入数量增多，载流子迁移率增大[14]。温度的变化影响绝缘中空间电荷的数量[15]。空间电荷的积聚加速电场畸变，引发绝缘老化，导致电树枝的生长，而载流子的运动又与电树枝的生长有着紧密的关系。因此，温度的变化与电树枝的生长特性有着复杂而又紧密的联系。

塑料绝缘电缆因其具有良好的电气、机械和热性能而得到快速推广，其中交联聚乙烯（Cross Linked Polyethylene，XLPE）高压直流电缆性能突出、应用最为广泛[16]。但 XLPE 电缆的最高工作温度仅为 70℃，同时生产 XLPE 电缆时用到的交联剂及交联过程中产生的副产物等杂质可能会引入绝缘层内部，使得直流电场下空间电荷积聚更加严重，从而加速绝缘老化。交联过程使聚乙烯从热塑性材料转变成了热固性材料，因此在电缆寿命到期后无法直接回收再利用，将不可避免地产生大量的废弃交联聚乙烯电缆绝缘材料从而产生环保问题[17]。聚丙烯（Polypropylene，PP）绝缘材料具有更高的熔点，可以满足电缆在较高温度下运行的需求。PP 具有较高的击穿强度和体积电阻率，对提高电缆运行电压等级和线路载流量意义重大。另外，由于没有交联过程，PP 在电缆寿命到期后可以回收再利用，是环保型直流电缆绝缘材料[17-18]。由于 PP 材料的研究时间还相对较短，对 PP 材料的老化击穿特性认识不足，因此需要对 PP 材料在不同条件下的老化击穿特性进行系统研究，为电缆的结构设计和寿命预测提供理论依据。

本文对比了相同条件下 PP 与 XLPE 电树枝生长特性，分析了直流脉冲复合场、温度等因素对聚丙烯电树枝生长特性的影响规律，探讨了不同方法抑制电树枝的机理。

2 PP 与 XLPE 电树枝生长特性对比

为了对比 PP 和 XLPE 的耐电树枝性能，天津大学对相同脉冲电压下的 PP 和 XLPE 分别进行了电树枝生长实验[19]。研究发现，PP 中的电树枝形态比 XLPE 更加稀疏，树枝通道更细。同时，在加压时间为 10min 时，PP 中的电树枝起始概率更低，这意味着在 PP 中电树枝更不易被引发，如图 1 所示。在相同时间内，PP 中电树枝生长速度更慢，分形维数更小，如图 2 所示。Holto 等研究了 PP 与 XLPE 中电树枝形态，发现 PP 中击穿前有单支和多支两类电树枝生长，单支电树枝到达地电极就发生击穿，而多支电树枝要有多个枝干到达地电极才会发生击穿。而 XLPE 击穿前更易形成丛林状电树枝，如图 3 所示。同时推测，PP 中形成的电树枝区域比 XLPE 中形成的电树枝区域具有更低的导电性[20-21]。

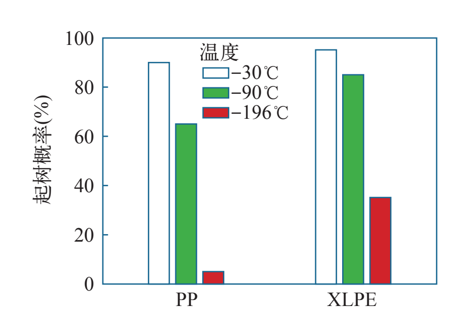


图 1 PP 与 XLPE 中的电树枝起始概率[19]

Fig.1 Tree inception probability in PP and XLPE[19]

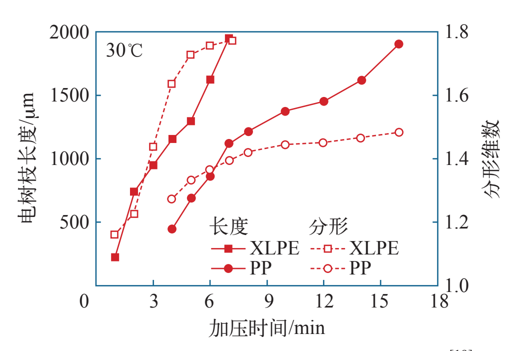


图 2　PP 与 XLPE 中的电树枝生长特性 [19]

Fig.2　Propagation characteristics of electrical trees in PP and XLPE[19]

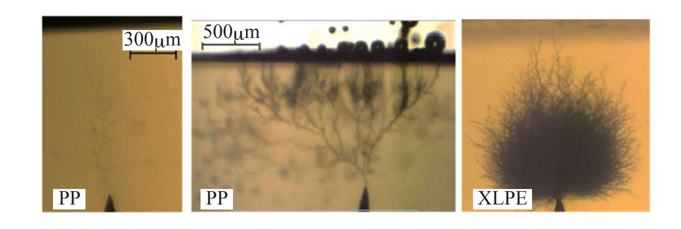


图 3　PP 与 XLPE 中的典型电树枝击穿前形态 [21]

Fig.3　Typical pre-breakdown structure of electrical trees in PP and XLPE[21]

3　复合场对电树枝的影响研究现状

3.1　直流脉冲电压复合对电树枝生长特性的影响

高压直流电缆在运行过程中，将受到雷击过电压和十二脉动引起的脉冲电压的影响。而且在实际电缆电路运行中，产生的脉冲电压幅值和频率多变 [22-23]。当这些脉冲与高压直流电缆中的额定直流电压相复合时，将产生一个复杂的直流脉冲复合场，引起线路电压急剧变化，加剧电场畸变，导致电树枝的引发。

天津大学研究了不同幅值直流电压与脉冲电压叠加复合场下聚丙烯中的电树枝引发与生长特性 [24]。研究发现，当直流电压从 −5kV 增加到 −15kV 时，电树枝生长速率增加，如图 4 所示。

图 5a 为 −5kV，−15kV 直流电压与 +25kV 脉冲复合时的电荷输运过程。当针尖施加直流电压时，电子由针尖注入并聚集在针尖周围。正脉冲电压施加在针尖后，部分电子被从针尖抽出，当复合电压极性由负向正变化时，正电荷注入。负电荷与正电荷复合产生能量，加速电树枝生长 [4]。随着电压极性由负向正的变化，电子由同极性空间电荷转变为异极性空间电荷，使电场畸变，产生局部放电，导致分子链断裂 [25]。随着直流电压幅度从 −5kV 增大到 −15kV，由于肖特基发射，针尖注入了更多的同

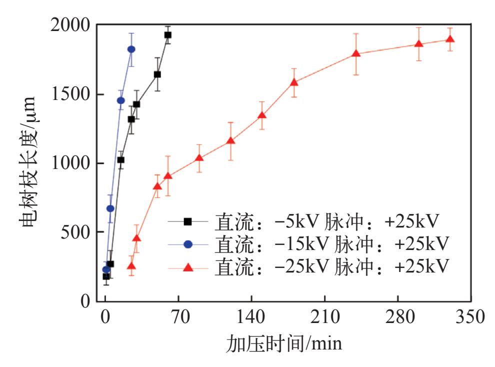
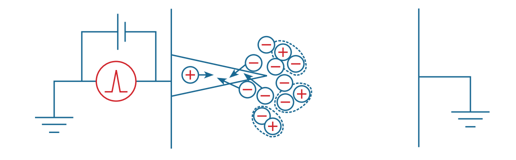
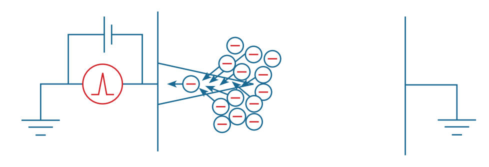


图 4　不同直流幅值与 +25kV 脉冲电压相复合时的电树枝长度与生长时间关系图 [24]

Fig.4　Relationship between the tree length and the treeing time of different DC amplitudes and +25kV pulse combined voltages[24]



（a）−5kV，−15kV 直流和 +25kV 脉冲复合电压



（b）−25kV 直流和 +25kV 脉冲复合电压

图 5　不同直流幅值与 +25 kV 脉冲电压相复合时的电荷输运过程 [24]

Fig.5　Charge transport processes under different DC and +25kV pulse combined voltages[24]

极性空间电荷。当施加脉冲电压和改变电压极性时，电场畸变更加严重，导致更强烈的放电 [26]。

图 6 为 t_0 时刻（复合电压首次达到最大幅值时）从针尖到地电极的模拟电场分布 [27]。当都与 +25kV 的脉冲电压复合时，−15kV 直流电压下的电场峰值更大，表明 −15kV 时的极性变化作用效果更强。然而，如图 4 所示，当直流电压从 −15kV 增加到 −25kV 时，生长速率降低。+25kV 脉冲与 −25kV 直流电压复合时的电荷输运过程如图 5b 所示。在施加脉冲电压后，由于针尖的电势降低，电子被抽出 [28]。这种电荷运动使分子链断裂，导致电树枝生长。由于缺乏极性变化过程，同时复合电压的平均值减小，+25kV 脉冲与 −25kV 直流复合电压下的电树枝生长速率小于 +25kV 脉冲与 −5kV，−15kV 直流复合电压下的电树枝生长速率。

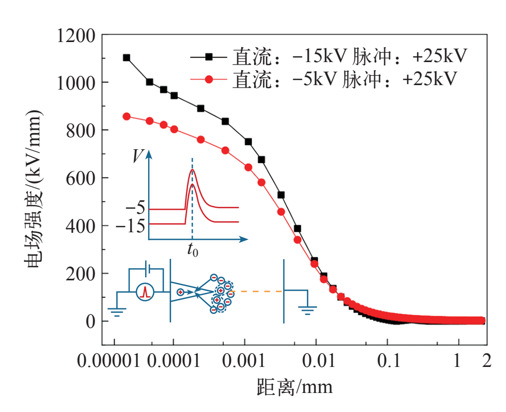


图 6　不同幅值直流电压与 +25kV 脉冲电压复合时从针尖到地电极的电场分布模拟 [24]

Fig.6　The simulated electric field distribution of different DC amplitudes and +25kV pulse combined voltages from the needle tip to the ground electrode[24]

研究发现，脉冲幅值对电树枝结构有很大影响，如图 7 所示。随着电压的增加，电荷注入深度越深，形成的电荷前沿就离针尖或电树枝末端越远。电树枝更容易在电荷前面分叉 [4]。因此，随着脉冲幅值的增大，从主分支中生长的侧枝较多。脉冲幅度对电树枝生长有显著影响。随着振幅的增大，生长速率和累积损伤增加。由于较高的复合电压电场强度，与直流电压极性相同的脉冲电压比极性相反的脉冲电压更容易引起击穿 [24]。

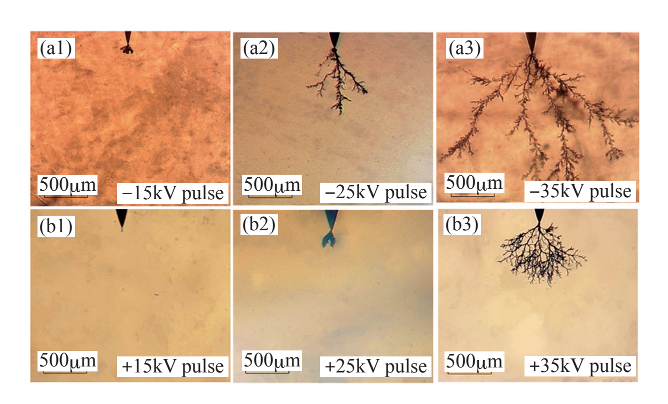


图 7　不同幅值脉冲电压与 −25kV 直流电压复合时电树枝形态 [24]

Fig.7　Typical electrical tree structures of different pulse amplitudes and −25kV DC combined voltages[24]

研究发现，在电场极性翻转的情况下，由于空间电荷的作用，电场会发生非常严重的畸变 [25-26]。Tanaka 研究发现，在 80kV/mm 电场下极化 30min 后，由于阴极处负电荷的积聚，阴极处的电场降低到约 50kV/mm，而阳极的电场增加到约 120kV/mm。当外施电压发生极性反转后，由于空间电荷无法突变，所以空间电荷所产生的电场与外加电场共同作用，使阴极处的电场增大到 130kV/mm 左右 [29]。研究发现，极性反转会降低击穿场强。在施加直流电压后，测量试样的正脉冲电压击穿场强，与正极性直流预压下的击穿强度相比，负极性直流预应力下的击穿强度更低 [26]。西安交通大学对直流预压后的脉冲电压下的 XLPE 电树枝起始电压进行了研究。结果表明，电树枝长度主要由脉冲电压的幅值决定，而直流预压的影响不大 [30]。Saito 等研究了直流预压后脉冲电压下聚乙烯（Polyethylene，PE）中电树枝的引发特性，发现直流预压后不同的停留时间会影响电荷特性从而改变电树枝引发特性 [31]。虽然这些研究在一定程度上发现了空间电荷对电树枝生长特性的影响，但在实验中并没有真正实现直流和脉冲电压的叠加而为直流预压。

3.2　其他复合电压对电树枝生长特性的影响

直流输电系统中由于整流器等电力电子器件，输出的直流电压中含有大量的谐波，谐波系数可达 10% 以上。当直流电缆系统中含有谐波分量时，谐波分量的大小以及频率都会对直流电缆的电树枝生长特性造成影响。Iddrissu 等研究了直流和交流复合电压对环氧电树枝生长特性的影响。结果表明，在正极性和负极性的直流偏置电压下，电树枝生长特性不同 [32]。同时，在直流和交流复合电压下，交流电压幅值对电树枝的电生长特性有很大的影响 [33]。这些研究对于直流与交流复合场下的电树枝生长机理提供了一定基础，但不同材料中电树枝生长特性不同，对于聚丙烯中的复合场电树枝生长特性仍待研究。

4　温度对电树枝的影响研究现状

天津大学研究了不同温度下（−196℃ ~ 130℃）聚丙烯电树枝生长特性 [19,34]。发现，当温度在 −196℃ ~ −30℃区间变化时，电树枝形态由树枝状变为丛林状，最终又为树枝状，见下表。

表　不同温度及频率下电树枝形态 [19]

Tab.　Typical structure of electrical trees at different temperatures and frequencies[19]

幅值 /kV	频率 /Hz	−30℃	−90℃	−196℃
15	400	树枝状	丛林状	树枝状
15	800	树枝状	丛林状	树枝状
15	1 200	树枝状	丛林状	树枝状

温度的变化影响材料的机械性能。随着温度的降低，PP 的弹性模量增加，这意味着 PP 在 −90℃时比 −30℃更脆，更容易开裂。在热电子撞击分子链产生电树枝通道的同时，会产生机械裂纹，这些裂纹也作为缺陷存在，雪崩放电也会在这些机械裂纹中产生，形成更加密集的电树枝结构。在 PP 劣化的过程中，氧气也起了重要的作用。当自由基与氧发生反应时，会产生自氧化反应，聚合物在此过程中被分解。但在 −196℃时，氧气液化，自氧化反应不易发生。因此，在 −196℃下，PP 的分子链极难被打破，形成稀疏的树枝状结构电树。当温度由 50℃增大到 130℃时，电树枝结构不变，均为树枝状电树，但是随温度升高，电树枝枝干变粗。当温度由 50℃增大到 110℃时，电树枝生长速度增快，但 130℃时的电树枝生长速度比 110℃时慢，如图 8[34] 所示。

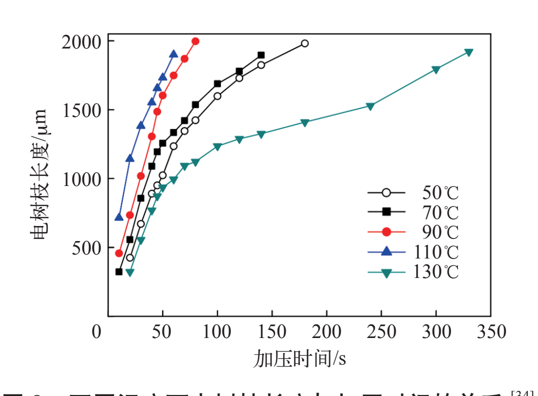


图 8　不同温度下电树枝长度与加压时间的关系 [34]

Fig.8　Relation between the tree length and the treeing time under different temperatures[34]

脉冲电压施加在针尖后，当外加电压超过注入势垒后，电荷由针尖注入，在电荷的入陷过程中，多余的能量转移给电子，使之成为热电子，热电子撞击分子链，使聚合物降解成自由基，氧气的参与加快了这个过程，不断重复这个过程之后，低密度区形成，在低密度区中碰撞电离，最终导致电树枝的引发。随着温度由 50℃升高到 110℃，一方面，热能使主链上的单键旋转，并激发分子链的运动。随着温度的升高，分子链的热运动逐渐增大，导致聚合物链段部分松弛，削弱针尖周围的区域，造成电树枝引发概率增大。同时，在高温及高场强的作用下，一些深吸附在聚合物基体中的氧气释放出来参与氧化反应，造成生长速度加快。另一方面，随着温度的升高，部分结晶区域中的大晶体缓慢地融化，非晶区部分增加，自由体积增大。电子在自由体积中加速，获得更大的能量。但由 DSC 曲线可知，在 130 ℃时，晶体融化非常厉害，接近于熔点的温度。此时弹性模量会突然降低，更易形成密集的电树枝区域。随着密集区域的形成，一些注入的电荷被捕获并且分布均匀。空间电荷层将形成一个电场屏蔽，导致在 130℃的针尖处电场强度减少。因此，130℃的增长速度比 110℃慢。

为了进一步研究原始样品和击穿通道的微观结构差异，天津大学还分别用扫描电子显微镜（SEM）和红外光谱对其进行了研究 [34]。研究发现，击穿通道比原始试样多了 O 元素，如图 9 所示。

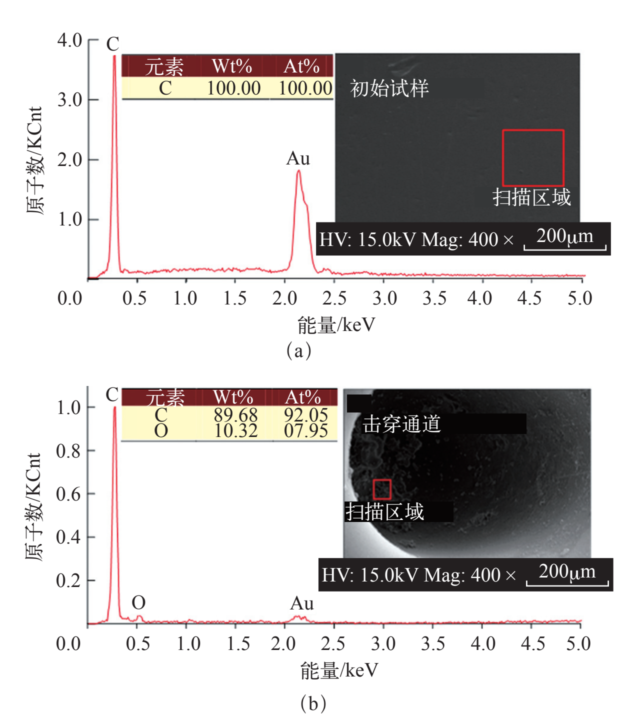


图 9　扫描电镜观察和 EDAX 分析原始样品和击穿通道 [34]

Fig.9　SEM observation and EDAX analysis of the original sample and breakdown channels[34]

击穿通道的成分组成比原始试样多 C＝O 和 C-O 基团。Kosaki 等研究发现，温度对直流电树枝起始电压有影响，在 20℃和 −196℃时，直流电树枝的起始电压分别为 35kV 和 50kV 以上 [35]。Ieda 等在不同温度下观察了直流电树枝的长度，发现在正直流电压下，电树枝长度随温度的升高而增大 [36]。通过对不同温度下直流接地电树枝的研究发现，随着温度升高，直流接地电树枝的长度也增大。随着温度的升高，载流子运动速度变快，造成深陷阱中的电荷更易脱陷，因此电树枝长度变长 [37]。温度对电树枝形态也有影响，由于高温下的部分节段弛豫，在较高的温度下，电树枝更容易形成较长的单枝状树 [38]。

5 抑制电树枝引发及生长的方法

纳米复合材料是指在高分子中均匀添加少量纳米级别（通常为 10% 以下）的颗粒后所形成的新型材料，多数学者认为，纳米复合材料中聚合物基体与纳米粒子间形成的界面区域引入了大量陷阱，改变了复合材料的陷阱能级，从而对电树枝的生长产生了重要影响 [39]。天津大学研究在 PP 中添加聚氧化乙烯（Polyoxyethylene，POE）可以提高 PP 的韧性，但经实验发现，PP/POE 共混物的空间电荷积聚增多。在 PP/POE 中添加纳米 ZnO 颗粒可以提高抗拉伸强度，同时仍保持了较好的机械韧性。纳米 ZnO 颗粒使 PP/POE 的陷阱能级密度增大，减少电荷注入，抑制了空间电荷的积聚。与 PP/POE 共混物相比，PP/POE/ZnO 纳米复合材料的介电常数较小，且击穿强度和体电阻率也得到了提高 [40]。Montanari 等研究了添加合成蒙脱土（Montmorillonite，MMT）纳米颗粒的 iPP 和 sPP 的纳米复合材料的电荷俘获行为特性，与纯 PP 相比，纳米复合材料的电荷俘获能力明显增强，直流极化电场下空间电荷积聚的减少说明纳米复合材料的绝缘性能得到整体提高 [41]。纳米蒙脱土（MMT）具有一维纳米层状结构，哈尔滨理工大学研究发现，在 PE 和 PP 中添加适量 MMT，可以抑制电树枝的生长 [42-43]。分析认为，MMT 在 PE 和 PP 中抑制电树枝的作用机理相似。一方面，MMT 的添加主要抑制电树枝沿电场方向的生长，当电树枝生长至 MMT 时，无法穿越 MMT 片层而只能沿着表面生长，而后绕过片层发展。另一方面，MMT 通过改变结晶尺寸来提高耐电树枝化特性。同时，MMT 的加入将 PP 的大结晶变为片晶结构，影响结晶区 / 非结晶区的界面能，增加了电树枝的生长阻力。纳米蒙脱土的引入从物理阻挡及结晶形态改变两个方面解释了对电树枝生长特性的影响，但对层状纳米颗粒及球形纳米颗粒的区别论证较少。

目前的研究表明，在聚合物中加入能够俘获强电场下材料中高能电子的电压稳定剂，可以提高材料的耐电树枝化能力 [44-47]。以芳香族化合物为代表的电压稳定剂的作用机理如图 10 所示 [48]。由于大多数芳香族化合物具有较高的电子亲和能，在强电场作用下，将先受到电子的冲击并被激发或电离，不易再破坏聚合物的分子链，从而提高了绝缘材料的耐电性能；芳香族化合物激发所形成的激发态分子将通过发光或振动将能量以相对无害的形式释放，并还原成初始状态，而电离所形成的阳性游离基将通过与电子作用还原成初始状态。由于大多数芳香族类化合物的电离能都低于聚合物分子链的键能，在高电场作用下，芳香族化合物能与高能电子结合发生电离，从而大幅削弱聚合物中注入的电子能量，提高了聚乙烯绝缘材料的耐电性能。同时，芳香族化合物还能与已发生电离的芳香族化合物发生作用，被还原成初始状态。从机理上分析，这种电压稳定剂不属消耗性，可以一直发挥作用，具有极高的研究价值。但是，现有研究大多数是针对交流电压下的电树枝生长进行研究，对于直流下电树枝的生长是否仍有抑制作用，尤其对于聚丙烯材料电树枝是否有抑制作用，还有待于进一步研究。

图 10　芳香族化合物类电压稳定剂作用机理 [48]

Fig.10　Mechanism of aromatic compounds as voltage stabilizer[48]

S.S. Bamji 等学者认为在电树枝引发及生长阶段，在 PE 无定形相中存在的微量的氧气产生了很重要的作用。氧气与聚合物发生氧化连锁反应，加速分子链的断裂 [49]。而抗氧剂的添加，可对聚合物中的氧化连锁反应起到抑制所用，从而抑制电树枝的生长。Y. Sekii[50-51] 等研究了酚类和硫类抗氧剂对 XLPE 直流接地电树枝引发特性的影响。发现酚类抗氧剂对直流接地电树枝起始电压未产生明显影响，而硫类抗氧剂可以提高起始电压。在接地的时候，由于抗氧剂的加入起到了类似陷阱的捕获电荷作用，因此电树枝得到了抑制。目前关于添加抗氧剂的聚丙烯复合绝缘材料电树枝特性的研究较少，对于抗氧剂是否可以对聚丙烯中的电树枝生长起到抑制作用还需进一步深入研究。

6 结论

通过与 XLPE 对比发现，PP 中更不易引发电树枝，电树枝更不易在 PP 中生长。当直流脉冲复合电压存在极性变化过程时，由空间电荷造成的电场畸变将加剧电树枝生长过程。同时，一定范围内的温度升高将加剧电树枝的生长过程，但接近 PP 熔

融温度时反而会减慢电树枝的生长过程。另外，环境友好型直流电缆料聚丙烯绝缘的电树枝还有不少问题需要深入研究。由于直流电缆运行工况复杂，多物理场耦合作用下的电树枝生长特性及其机理仍有待于进一步研究。同时，目前对于电压稳定剂和抗氧剂的作用及其失效机理仍不清楚，尤其对于直流电压下电树枝的生长是否有效，还有待于进一步探讨。

参考文献

[1] Kosaki M, Nagao M, Shimizu N, et al. Solid insulation and its deterioration[J]. Cryogenics, 1998, 38(11): 1095-1104.

[2] Danikas M G, Tanaka T. Nanocomposites-a review of electrical treeing and breakdown[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(4): 19-25.

[3] Ieda M, Nawata M. A consideration of treeing breakdown in polymers[C]. IEEE Annal Report Conference Electric Insulation and Dielectric Phenomenon, Tokyo, Japan, 1972: 143-150.

[4] Tanaka T. Charge transfer and tree initiation in polyethylene subjected to AC voltage stress[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(3): 424-431.

[5] Bamji S S, Bulinski A T, Densley R J. Evidence of near-ultraviolet emission during electrical-tree initiation in polyethylene[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(2): 694-699.

[6] Dissado L A. Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002, 9(4): 483-497.

[7] Lu W, Ooi B T. DC overvoltage control during loss of converter in multiterminal voltage-source converter-based HVDC (M-VSC-HVDC)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 915-920.

[8] Zhou C, Wang P. A study of temporary overvoltage at HVDC rectifier stations[C]. IEEE Electrical Power and Energy Conference, 2011: 211-215.

[9] Hingorani N G. Transient overvoltage on a bipolar HVDC overhead line caused by DC line faults[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, PAS-89(4): 592-610.

[10] Du B X, Li Z L, Li J. Effects of direct fluorination on space charge accumulation in HTV silicone rubber[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2353-2360.

[11] Chen G, Hao M, Xu Z, et al. Review of high voltage direct current cables[J]. Csee Journal of Power & Energy Systems, 2015, 1(2): 9-21.

[12] Stancu C, Notingher P V, Notingher P, et al. Space charge and electric field in thermally aged multilayer joints model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 633-644.

[13] Shimizu N, Shibata Y, Ito K, et al. Electrical tree at high temperature in XLPE and effect of oxygen[C]. IEEE Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000: 329-332.

[14] Wang Y, Li G, Wu J, et al. Effect of temperature on space charge detrapping and periodic grounded DC tree in cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 23(6): 3704-3711.

[15] Wang Y, Wu J, Yin Y, et al. Space charge measurement of cross-linked polyethylene at low temperatures polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3860-3868.

[16] 杜伯学，李忠磊，杨卓然，等．高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展 [J]．高电压技术，2017，43(2)：344-354．
Du Boxue, Li Zhonglei, Yang Zhuoran, et al. Application and re-search progress of HVDC XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 344-354.

[17] Liu Ziyu, Liu Rongsheng, Wang Huiming, et al. Space charges and initiation of electrical trees[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(1): 83-90.

[18] 何金良，彭琳，周垚．环保型高压直流电缆绝缘材料研究进展 [J]．高电压技术，2017，43(2)：337-343．
He Jinliang, Peng Lin, Zhou Yao. Research progress of environ-ment-friendly HVDC power cable insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 337-343.

[19] Du B X, Zhu L W, Han T. Effect of low temperature

on electrical treeing of polypropylene with repetitive pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 1915-1923.

[20] Holto J, Ildstad E. Electrical treeing in extruded polypropylene high voltage cable insulation[C]. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2010: 373-376.

[21] Holto J, Ildstad E, Lunde I. Characteristics of electrical treeing in extruded polypropylene and cross-linked polyethylene cable insulation[C]. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2012: 63-67.

[22] Hagiwara M, Akagi H. Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.

[23] Murata Y, Katakai S, Kanaoka M. Impulse breakdown superposed on ac voltage in XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1996, 3(3): 361-365.

[24] Zhu L W, Du B X, Su J G, et al. Electrical treeing initiation and breakdown phenomenon in polypropylene under dc and pulse combined voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. (accepeted for publication)

[25] Liu R, Jaksts A, Tornkvist C, et al. Moisture and space charge in oil-impregnated pressboard under HVDC[C]. IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998: 17-22.

[26] Kaneko K. Effect of space charge on the breakdown strength under polarity reversal[J]. Electrical Engineering in Japan, 1986, 106(3): 565-572.

[27] Liang H, Du B, Li J, et al. Numerical simulation on the surface charge accumulation process of epoxy insulator under needle-plane corona discharge in air[J]. Iet Science Measurement & Technology, 2018, 12(1): 9-16.

[28] Tanaka T. Space charge injected via interfaces and tree initiation in polymers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2001, 8(5): 733-743.

[29] Tanaka Y, Kodera R, Kato T, et al. Observation of space charge accumulation behavior in cross-linked polyethylene at voltage polarity reversal[C]. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Ann Arbor, USA, 2015: 23-26.

[30] Liu Y, Cao X L. Electrical tree initiation in XLPE cable insulation by application of DC and impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1691-1698.

[31] Nota F, Yoshimura N, Oota T. Tree initiation in polyethylene by application of DC and impulse voltage[C]. IEEE International Conference on Electrical Insulation, 1976: 205-208.

[32] Iddrissu I, Rowland S M. The impact of DC bias on electrical tree growth characteristics in epoxy resin samples[C]. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Piscataway, NJ, USA, 2015: 876-879.

[33] Liu M, Liu Y, Li Y, et al. Growth and partial discharge characteristics of electrical tree in XLPE under AC-DC composite voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2282-2290.

[34] Du B X, Zhu L W, Han T. Effect of ambient temperature on electrical treeing and breakdown phenomenon of polypropylene with repetitive pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2216-2224.

[35] Kosaki M, Nagao M, Shimizu N, et al. Solid insulation and its deterioration[J]. Cryogenics, 1998, 38(11): 1095-1104.

[36] Ieda M, Nawata M. DC treeing breakdown associated with space charge formation in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1977, EI-12(1): 19-25.

[37] Wang Y, Li G, Wu J, et al. Effect of temperature on space charge detrapping and periodic grounded DC tree in cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 23(6): 3704-3711.

[38] Zhang Y, Zhang L, Zhou Y, et al. Temperature dependence of DC electrical tree initiation in silicone rubber considering defect type and polarity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 2694-2702.

[39] 罗杨，吴广宁，彭佳，等．聚合物纳米复合电介

质的界面性能研究进展 [J]．高电压技术，2012，38(9)：2455-2464．
Luo Yang, Wu Guangning, Peng Jia, et al. Research progress on interface properties of polymer nanodielectrics[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2455-2464.

[40] Du B X, Xu H, Li J, et al. Space charge behaviors of PP/POE/ZnO nanocomposites for HVDC cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(5): 3165-3174.

[41] Montanari G C, Teyssedre G, Laurent C, et al. Investigating charge trapping behaviour of nanocomposite isotactic and syndiotactic polypropylene matrix[C]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004, 2: 836-839.

[42] 章华中，李剑，梁勇，等．低密度聚乙烯 - 蒙脱土纳米复合材料的电树枝生长特性 [J]．中国电机工程学报，2010，30(31)：137-142．
Zhang Huazhong, Li Jian, Liang Yong, et al. Growth properties of the electrical trees in LDPE-MMT nano-composites[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 137-142.

[43] 迟晓红．纳米蒙脱土 / 聚烯烃复合材料结构形态与电树生长机理研究 [D]．哈尔滨：哈尔滨理工大学，2015．

[44] Heidt L J. Solid dielectric polyolefin compositions containing various voltage stabilizers: U. S. , Patent 3, 522, 183[P]. 1970.

[45] Hunt G H. Cross-linked polyolefin compositions: U. S. , Patent 3, 632, 680[P]. 1972.

[46] Kisin S, Doelder J D, Eaton R F, et al. Quantum mechanical criteria for choosing appropriate voltage stabilization additives for polyethylene[J]. Polymer Degradation & Stability, 2009, 94(2): 171-175.

[47] Jarvid M, Johansson A, Bjuggren J M, et al. Tailored side-chain architecture of benzil voltage stabilizers for enhanced dielectric strength of cross-linked polyethylene[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 2014, 52(16): 1047-1054.

[48] Ashcraft A C, Eichhorn R M, Shaw R G. Laboratory studies of treeing in solid dielectrics and voltage stabilization of polyethylene[C]. IEEE International Conference on Electrical Insulation, Montreal, 1976: 213-218.

[49] Bamji S S, Bulinski A T, Densley R J, et al. Degradation mechanism at XLPE/semicon interface subjected to high electrical stress[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(2): 278-284.

[50] Sekii Y. Effects of phenolic and sulfur type antioxidants on polymeric dielectrics[C]. IEEE International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, Bali, Indonesia, 2006: 619-624.

[51] Sekii Y, Kawanami H, Saito M, et al. DC tree and grounded DC tree in XLPE[C]. IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Nashville, America, 2005: 523-526.